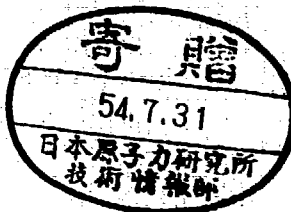




KEK-79-5
April 1979
A

AN IMPROVED SEPTUM MAGNET
IN THE KEK PROTON SYNCHROTRON (in Japanese)

Tadamichi KAWAKUBO, Yasuo HIGASHI, Toshio HONGO, Hideo HOSHINO
Hitoshi INOUE, Masaaki IWAI, Shigeru KASAHARA, Haruo KATO,
Yoshiharu KOBAYASHI, Kusuo SAKAI, Yukinori SAKAKIBARA,
Kiyoshi SATO and Akio TERASHIMA



NATIONAL LABORATORY FOR
HIGH ENERGY PHYSICS
OHO-MACHI, TSUKUBA-GUN
IBARAKI, JAPAN

KEK Reports are available from

Technical Information Office
National Laboratory for High Energy Physics
Oho-machi, Tsukuba-gun
Ibaraki-ken, 300-32
JAPAN

Phone: 02986-4-1171

Telex: 3652-534 (Domestic)
(0)3652-534 (International)

Cable: KEKOH

AN IMPROVED SEPTUM MAGNET
IN THE KEK PROTON SYNCHROTRON

Tadamichi KAWAKUBO, Yasuo HIGASHI, Toshio HONGO, Hideo HOSHINO,
Hitoshi INOUE, Masaaki IWAI, Shigeru KASAHARA, Haruo KATO,
Yoshiharu KOBAYASHI, Kusuo SAKAI, Yukinori SAKAKIBARA,
Kiyoshi SATO and Akio TERASHIMA

National Laboratory for High Energy Physics
Oho-machi, Tsukuba-gun, Ibaraki-ken, 300-32, Japan

Abstract

A pulse septum magnet used for beam injection and extraction is commonly installed in a vacuum chamber. In order to cool the magnet coil, metal tubes are attached to it by silver weld, and are drawn from the vacuum to the atmosphere through a flange of the chamber. For the electrical isolation of the coil from the flange, metalized ceramic joints should be inserted in the metal tubes between the coil end and the flange. But water leak into vacuum system will come out within a few years by electric corrosion at the silver weld of the ceramic joint. In our improved magnet, the metal tubes have not any joints in the vacuum chamber, and are drawn from the vacuum to the atmosphere with the same electric potential as coil's through isolated gauge-ports in the flange. As the metal tubes are now isolated by ceramic tubes in the atmosphere, the water leak from the silver weld can be repaired easily.

Another improvement is a supporting system of the magnet. The magnet is hung from the cover plate of the box type chamber. So, if a trouble of the magnet happens, we have only to change it for a spare with a cover plate. The position of the top flange of the chamber is arranged so accurately to the beam line that there is no necessary of the resetting after the change of spare.

In this paper, the method to fabricate the improved magnet is discussed in detail.

§1 序文

セプタムマグネットは、通常、真空チェンバーの内部に設置し、かつ、そのコイルには、水冷の必要がある。この為、種々の故障が生じやすく、又、もし、故障が生じた場合には、マグネットの残留放射線が多い為、修理が不可能であり、新品との置換えが必要である。

従って、セプタムマグネット製作上の最も重要な点は、出来るだけ故障しない事、及び、もし、故障した場合には、出来るだけ短時間に、新品と交換できるような構造にする事の2点である。

このたび、我々は、従来のタイプを改造し、上記の条件を十分満足するマグネットを製作したのでその製作法を概説する。なお、このマグネットは、KEKシンクロトロン中で運転して良好な結果を得ている。

§2 従来までのセプタムマグネットの問題点とその改良

(1) 冷却水パイプの電気絶縁と真空チェンバーからの取り出し

コイルの冷却水用パイプは、コイルに銀ロー付けしてある為、コイルと同電位になる。従って、そのパイプを、真空チェンバー内から大気中に引き出し、冷却水の配管をする為には、途中で、電氣的絶縁をとらなくてはならない。

従来までは、第1図(a)のように、パイプをコイルから引き出した直ぐで、第2図の構造を持つメタライズドセラミック製の絶縁パイプを銀ロー付けにより挿入し、電氣的に絶縁した後、第1図(b)図のようにして、大気中に引き出していた。しかし、この方法には、次のような欠陥がある。即ち、真空中に、冷却水銅パイプの銀ロー付けがある為、銀ロー付けが不完全な場合はもちろんの事、完全な場合でも、銅-銀ローという異種金属間の冷却水(純水)の存在により、電食が生じ、2、3年のうちには、必ず水漏れを生じる。

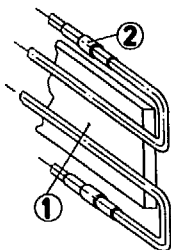


Fig. 1(a)
Septum conductor (old type)
1. OFHC copper plate (5mm²)
2. Ceramic joint of cooling water tube for isolation of coil.

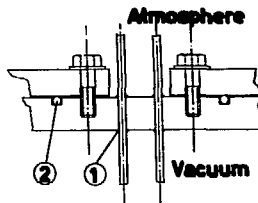


Fig. 1 (b)
Cross section of flange for cooling water tube
1. Silver weld of copper tube
2. O ring

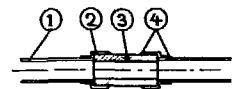


Fig. 2
Ceramic joint of cooling water tube

1. Copper tube (5mm ϕ -0.5mm²)
2. Kovar sheath
3. Ceramic tube metalized at ends (6mm ϕ -1mm²)
4. Silver weld

この改善法は、以下の通りである。真空チェンバー内では、絶対に冷却水パイプの接続箇所を設けない事、従って、パイプは、コイルと同電位のままチェンバー中を配管し、第3図の絶縁用ゲージポートにより、フランジとは、電氣的に絶縁を施した状態で大気中に取り出す。冷却水銅パイプは、大気中で、セラミック絶縁ジョイントと銀ロー付けて接続され、配管されるので、もし、銀ロー付け部で、電蝕により、水流れが生じたとしても、真空中でなく、大気中の水流れなので修理は、容易である。

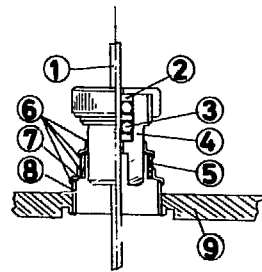


Fig. 3
Isolated gauge-port

1. Cooling water tube
2. Stainless steel collar for pressing O-ring
3. O-ring
4. Stainless steel gauge-port
5. Ceramic tube metalized at ends
6. Silver weld
7. Kovar sheath
8. Stainless steel tube
9. Stainless steel flange

(2) マグネットの固定法

従来のセプタムマグネットは、第4図に示すように、あらかじめ、真空チェンバー外で、車付き台座の上で組み立てられ、完成後、レールのついたチェンバーの中に挿入され、コイルの端末部を、チェンバーの外部に貫通している電流導入端子と、ボルトで固定されていた。

この方法では、もし、マグネットに故障が生じた場合、マグネットとチェンバーの分離に時間ばかり、残留放射線による作業者の被曝量は多大であるので、事実上、分離は不可能である。従って、故障時のスペアとしては、マグネットのみならず、真空チェンバーもセットで用意しておかねばならない。これは経済的にも不都合である。又、チェンバーの製作公差は、 $\pm 1\text{mm}$ であるのに対し、マグネットのセッティング精度は $\pm 0.5\text{mm}$ 以内を要求されるので、故障時のスペア交換後、再び、最初からセッティングをやり直さなければならない。

その改善法として、第5図のように、真空チェンバーを上部開口式の戸型チェンバーに変え、マグネットを上蓋に吊下げ式に改良した。この方式を採ると、故障の場合には、上蓋の締付けボルトをはずすだけで、チェンバーとマグネットの分離が可能であり、スペアとしては、マグネットと上蓋のみ用意しておけば良い。又、上蓋とチェンバーフランジとの取付け精度は、 0.5mm 以内には押えられるので、交換後のセッティングは、ごく短時間で済む。

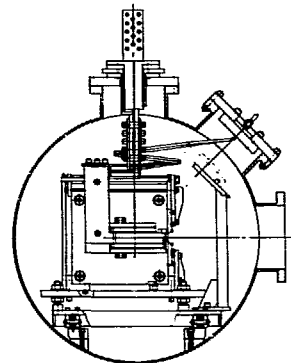


Fig. 4
Old type of septum magnet and chamber

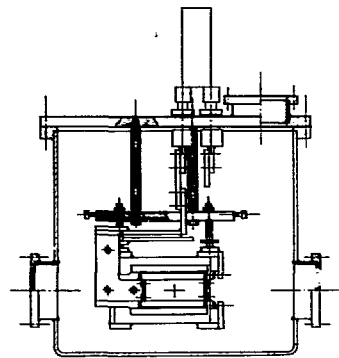


Fig. 5
Improved type of septum magnet and chamber

以上の主な2点の改造により、従来のセプタムの弱点は、一掃された。次に、この改良型セプタムマグネットの製作法を概説する。

§3 改良型セプタムマグネットの製作法

我々が現在までに製作した新型セプタムマグネットは、ブースター入射用、ブースター引出し用、主リング入射用の3種であるが、今回は、代表例としてブースター引出し用について述べる。

(1) 真空チェンバー

第6図にチェンバーの図を示す。ブースター引出し用セプタムは、コア長800mm、2ターンコイルの主セプタムマグネットと、コア長500mm、1ターンコイルの副セプタムマグネットから構成されている。どちらか一方が故障した場合、その故障したマグネットのみ交換すれば良いように、チェンバーには、独立に2つのフランジがあり、それぞれに、マグネットを中吊りにし上蓋が締付けられている。チェンバーの材質は、SUS304、その厚みは、側板で12mm、フランジ部で40mmである。又、このチェンバーを真空にした時の側板のたわみは、最大0.3mmである。

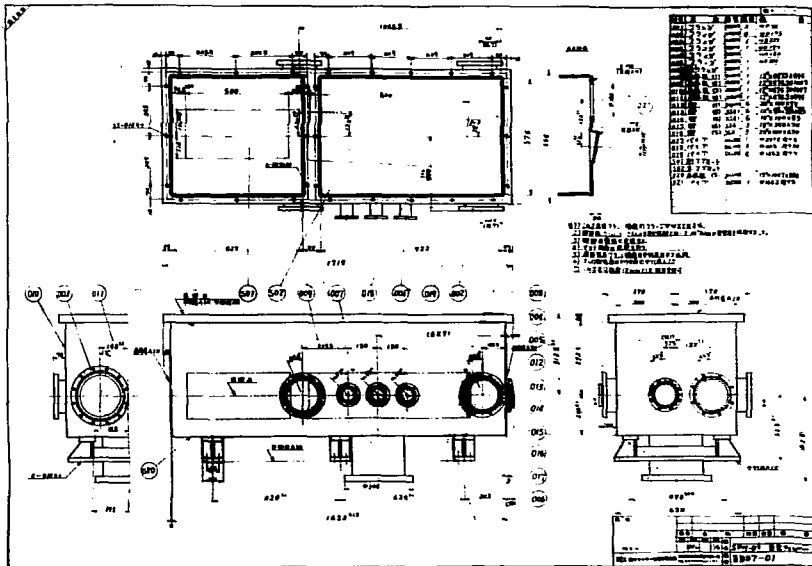


Fig.6
Plan of improved type of septum magnet chamber
(box type chamber with top large flanges)

(2) マグネット

第7図に、主セアタムマグネットの図を示す。以下に各部の説明を行う。

(i) コイル

第8図に示すように、セアタム側のコイルは、厚さ5mmの無酸素銅板であり、上下に、 $\frac{3}{16}$ インチ、肉厚0.8mmの銅パイプの半分が埋め込まれ、銀ロー付で接続してある。この銅コイルの全面に、0.3mm厚のセラミックコーティングがほどこされ、上部と下部は、それぞれ0.13mm厚のキャプトンマイラーで覆われている。コアー側のコイルは、厚さが8mmの無酸素銅板で、 $\frac{3}{16}$ インチの銅パイプは、完全に埋め込まれている。他は、セアタム側コイルと同様である。

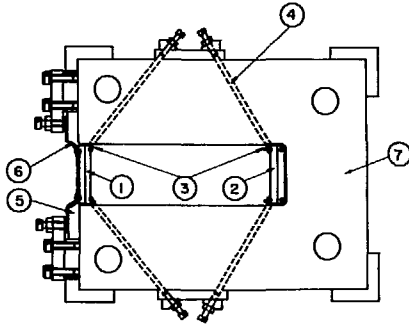


Fig. 7
Cross section of septum magnet

1. Copper hollow septum conductor
2. Copper hollow return conductor
3. KAPTON mylar (polyimide)
4. Iron rod for coil support
5. Stainless steel plate for coil support
6. Silicon steel plate for insulating magnetic leak field (0.35mm τ)
7. Iron laminated core

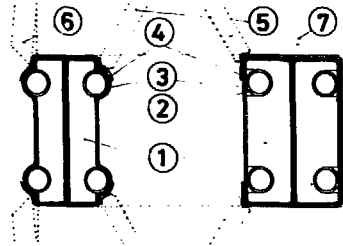


Fig. 8
Details of coil, supports and their isolation

1. OFHC copper plate (5mm τ , 8mm τ)
2. Copper tube ($\frac{3}{16}$ in -0.8mm τ)
3. Ceramic coating (0.3mm τ)
4. KAPTON mylar (polyimide) (0.13mm τ)
5. Ceramic coated iron rod for coil support
6. Ceramic coated stainless steel plate for coil support
7. Iron laminated core

(ii) コアー

0.35mm厚の無方向性ケイ素鋼板をスタックし、外側のSUS棒をA溶接でコアーに溶接して、コアー全体を固定する。約150mm間隔に、第7図に示すように、5mm内の斜方向穴を開け(スタック時に、既に、この穴を作っておく)、この穴に、下記のコイル内側押え棒を通す。

(iii) コイル押え

我々のセアタムマグネットは、パルス電流で励磁する。この為、コイルには、パルス状の力、及びその反発力が働き、振動する。この振動による衝撃音は、非常に大きく、又、コアーとコイルとの摩擦により、キャプトンマイラーの破壊や、セラミックコーティングの欠損が生じ、コイルは、絶縁不良となる。従って、コイルの固定が必要である。この固定の為、第7図のように、全面セラミックコーティングしたコイル押え板と、前述のコアー貫通穴に4.5mm内の全面セラミックコーティングしたFe製コイル押え棒を用い、コイルを両側から締付け固定する。

(iv) 磁気シールド板

第9図のように、コアーとコイルの表面が一致し、かつ、コアーとコイルのすき間が無い場合、セプタムマグネットの外側の残れ磁場はゼロとなるが、実際には、第8図のように、種々の絶縁材質や製作精度等により、0.8mm程度のすき間がある。この為、コアー内磁場に対する、セプタムコイル表面から外側へ5mm離れた位置でのコアー外残れ磁場の比は、1%である。このコアー外残れ磁場を、より小さくする為に、第7図に示すような0.35mm厚の無方向性ケイ素鋼板で、セプタムコイルを覆うと、残れ磁場の比は、0.3%となる。

又、マグネットの出入口部では、コアー内磁場のセプタムコイル外へのしみ出しが、最大5%となるので、このシールド板を、コアー長よりは、長めに作る事が必要である。本マグネットでは、コアー終了部より、40mm長くする事により、出入口部でのしみ出し比を1.1%とする事が出来た。(第10図参照)(第25(b)図参照)

(v) マグネット位置調整機構

我々のセプタムマグネットは、所定の位置に、0.5mmの精度で置かれている。そのセッティングの方法は後述するが、マグネットを三次元的に、±20mmの範囲で動かし得るように、第11図のような位置調整機構を上蓋に取り付ける。マグネットは、20mmφの4本のボルトにより、この位置調整機構に吊り下げられている。

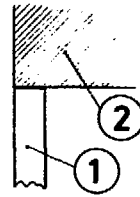


Fig. 9
Ideal setting of septum conductor to core

- 1. Septum conductor
- 2. Magnet core

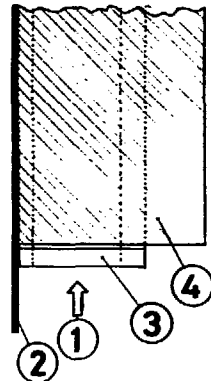


Fig. 10
Silicon steel plate jutting out to beam line at core end for shielding magnetic leak originated from fringe field

- 1. Beam line
- 2. Silicon steel plate (0.35 mm²)
- 3. Bridge connecting septum conductor with return conductor
- 4. Magnet core

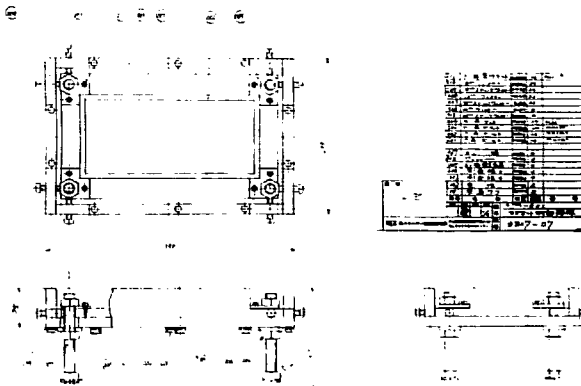


Fig. 11
Three dimensional adjustment mechanism of septum magnet, which is attached to cover plate.

(vi) 冷却水パイプと、その大気中への取り出し
 コイルの冷却水パイプの配管回路は、第12図のよう
 に、(冷却水OUTバルブ)→(セラミック絶縁ジョ
 イント^{第2回参照})→(絶縁用ゲージポート^{第3回参照})→(セプ
 タム側コイル)→(コー側コイル)→(絶縁用ゲージ
 ポート)→(セラミック絶縁ジョイント)→(冷却水
 INバルブ)である。主セプタムは、2ターンコイルで
 あるから、計8本のパイプが、第3図の絶縁用ゲージポ
 ートを経由して、つなぎ目無しで、大気中に引き出され
 る。これ等のパイプの互いの絶縁を取る為に、表面をセ
 ラミックコーティングしたパイプ絶縁支持台を、コー
 ーに密着する。第13図は、その一例で、この支持台によ
 り、4本のパイプが一度に、固定される。

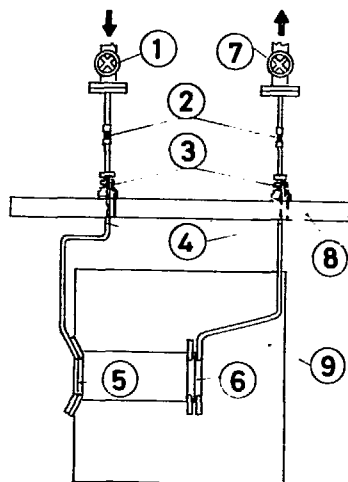


Fig. 12
Septum magnet cooling system

1. Water inlet valve
2. Ceramic joint
3. Isolated gauge-port
4. Copper tube
5. Septum conductor
6. Return conductor
7. Water outlet valve
8. Flange cover plate
9. Magnet core

(vii) 電流導入端子

真空と、大気とを結ぶ電流導入端子として第14図に
 示すような32mmφの銅の丸棒の真空電極を用いる。こ
 の両端には、10mm[±]の銅板をハンダ付けし、他との電気
 的接続には、1枚につきD.C.500Aまで保証される持
 殊平ワッシャーを間に挿入して、数ヶ所をボルト締めす
 る。大気中の配線の場合、パルス電流によるノイズ放射
 を防ぐ為に、陽極と陰極の銅板を2mm間隔で平行に配置
 し、これと、電カパルストランスとの配線には、巾150
 mm、厚み10mmの銅板を2枚並行に、2mm間隔で固定し
 たブスバーを用いる。

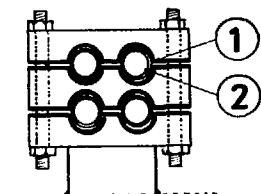


Fig. 13
Cooling water tube support

1. Stainless steel holder coated by ceramic
2. Water tube

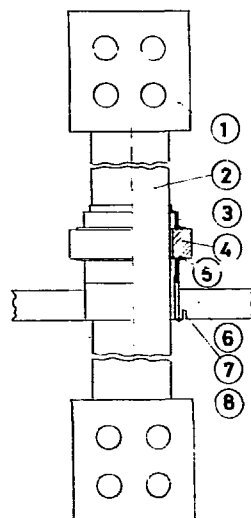


Fig. 14
Large current elec-
trode for vacuum
system

1. Copper plate ter-
minal in atmo-
sphere (10mm[±])
2. Copper rod (32mmφ)
3. Kovar sheath
4. Ceramic tube metal-
ized at ends
5. Silver weld
6. Stainless steel
flange
7. Stainless steel
tube
8. Ar weld

(3) セッティング

次に、マグネットを0.5mmの精度で、所定の位置にセットする方法について述べる。

(i) チェンバーのボンチ打ち

- ㊸ チェンバーフランジと上蓋は、精度よく加工されている事を確認し、所定の位置へ、互いにボルトで締めつける。
- ㊹ チェンバーを、高さの調節できる架台に乗せ、レベル(水平面上の高さを測量できる望遠鏡)を用いて、チェンバーの上蓋上面の四隅(第15図の㊸, ㊹, ㊺, ㊻点)が、約1mmの精度で、水平面上に来るように、架台を調節する。種々の歪により、この4点が、これ以上の精度で、水平面上に一致する事は、困難であり、多少の不一致は、本質的な問題ではない。
- ㊺ 次に、フランジ中心(第15図㊼点)を、ビーム中心軌道の高さとし、これを衝として、レベルにより、チェンバーの隅々にボンチを一周、打ってまわる。ボンチの印としては、他の隅と間違わぬように、第16図のように、3点を打ち、その中央の点を、真の印とする。
- ㊻ 同様にして、フランジ側面と、上蓋側面のボンチ可能なすべての隅の適当な高さに、印をつける。第17図のように傍に、スケールを垂直に立て、各点の位置を読み、それ等の距離を記録する。後の説明の都合上、

$$\begin{aligned} & \text{(上蓋側面の印)} \leftrightarrow \text{(ビーム中心軌道の印) 間の距離} = a \\ & \text{(フランジ側面の印)} \leftrightarrow \text{(") " } = b \end{aligned}$$
 とする。
- ㊼ 上蓋の横幅の中央(第15図の㊽, ㊾, ㊿, ㊿点)に印をつけ、上蓋とフランジ側面の中央点(㊿点と、その対称点)にも垂直の罫書を入れる。

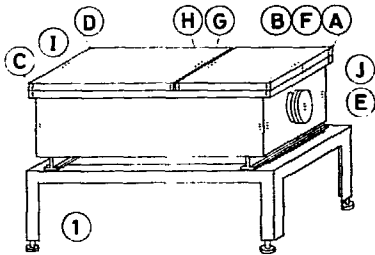


Fig. 15
Marks for setting chamber in vertical and radial directions

1. Vertical adjustment mechanism of chamber stand
- A, B, C, D. Edges at corner of cover flange
- E. Mark for setting chamber in vertical direction
- F, G, H, I, J. Marks for setting chamber in radial direction



Fig. 16
Mark pattern for setting chamber.

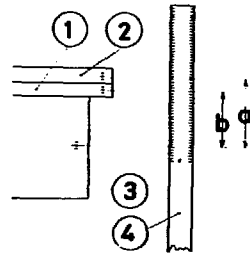


Fig. 17
Distances required for setting magnet vertically.

1. Top flange of chamber
2. Flange cover plate
3. Vertical beam line
4. Scale standing perpendicularly

(ii) マグネットの位置出し

② 第18図のように、マグネットを吊り下げた上蓋をチェンバーより取り出し、高さの調節できる架台の上に置く。側面の四ヶ所の隅の印をできる限り、水平面上に来るように、架台の高さを調節する。但し、この印は、チェンバーフランジに上蓋を締めつけた時につけたものである。今の状態では、4点必ずしも水平面上に来るとは限らない。我々の今までの経験では、これ等の点のズレは、±0.2mm以内であるので、セッティングに支障は無い。次に、マグネット位置の(高さ)、(水平方向)、(ビーム方向)の3方向についての位置出し法について述べる。

③ 高さの位置出し

マグネットコアのギャップ幅を C とすると、(第19図a)のような長さが $C/2$ 以上、かつ、 C 以下のスケールブロックをコアのギャップ内に垂直に立てる。(第19図b)のように、上蓋に垂直に立てたスケールにより、上蓋側面の点から下方の高さに、レベルの横カーソル線を合わせ、コア内のスケールブロックの $C/2$ 目盛び、このカーソル線に来るようにマグネットの吊り上げ高さを調節する。スケールブロックをコアの四隅に置いて、カーソル線と一致する高さがおすべて $C/2$ 目盛びに来るように調節した時、高さの位置出しは終了である。

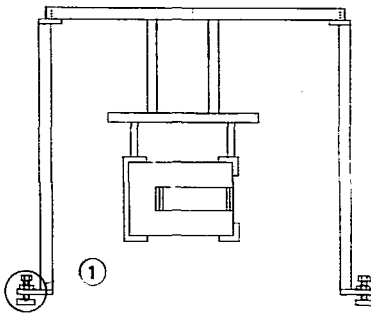


Fig. 18
Stand for adjusting level marks of cover plate on horizontally same plane.
1. Adjustment mechanism of stand in vertical direction

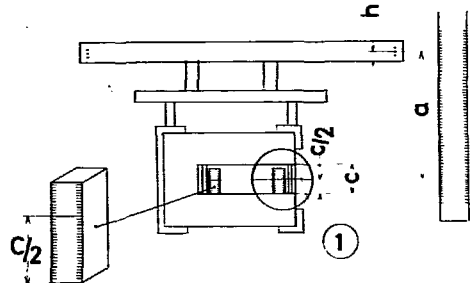


Fig. 19(a)
Scale for setting magnet vertically.

Fig. 19(b)
Method of measuring vertical position of magnet
1. Horizontal line in level-telescope

④ 水平方向の位置出し

上蓋の横幅の中央点(第15図のⒶとⒸ点、又は、ⒶとⒸ点)から垂線を下ろし、(第20図)のように、レベルの縦カーソル線と2つの垂線とが一致するように、レベルの位置を調節する。設計図上での計算により、マグネットのセアタム側でのコア端点と、チェンバー中央線との距離 e 、 d は簡単に計算できる。(第21図a)のスケールブロックをコア内に入れ、(b回)のようにセアタムコアの出口と入口の点で、コアと並行に、しかも、スケールの端をセアタムコイルに密着させて設置し、カーソル線と一致する値を読む。セアタムコイルの厚み

を付与すると、コアー入口と出口での測定値が、それぞれ $(d-f)$ 、 $(e-f)$ となるようにマグネットの位置を調節したら、水平方向の位置出しは終了である。

④ ビーム方向の位置出し

(第22図)で示すように、上蓋の③点から垂線を下ろし、コアー端点との距離が設計寸法に合うよう調節する。

以上で三方向の位置出しは終了であるが、実際は、一方向の位置調整を行うと、他の二方向にも影響を与える。従って、上述の三方向の位置出しを数回行い、最終的に、すべての方向のマグネット位置が、公差内に入っている事を確認しなくてはならない。

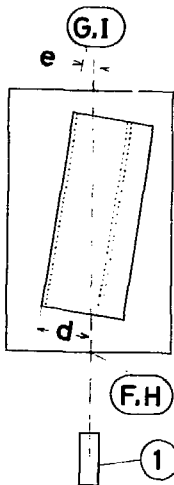


Fig. 20
Method of setting septum magnet in radial direction
1. Level-telescope

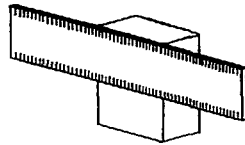


Fig. 21(a)
Scale for setting magnet in radial direction.

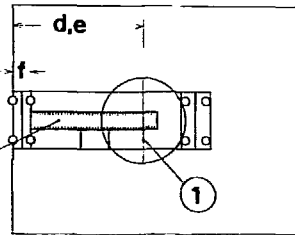


Fig. 21(b)
Method of measuring radial position of magnet
1. Vertical line in level-telescope

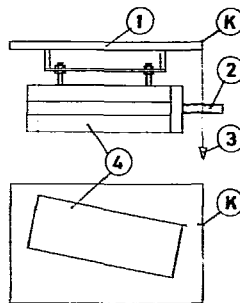


Fig. 22
Method of setting septum magnet in axial direction
1. Flange cover plate
2. Scale parallel to axial direction
3. Plumb
4. Magnet core

(iii) このマグネットのスペアー製作の爲に

マグネットが故障した場合、上蓋ごと取り去り、次のスペアーと交換しなくてはならない。この時、上蓋とチェンバーフランジとをボルト締めするだけで、スペアーマグネットを所定の公差内で設置する為には、以下の注意が必要である。

◎スペアー用の上蓋寸法は、公差内に作る事。

◎一番最初に製作したマグネットの、上蓋側面の高さの位置出し用の印と、上蓋下面までの距離(第19図bの図中の距離h)を、すべての隅で予め測定しておき、スペアー用の上蓋側面の同じ位置に印をつける。スペアー用マグネットの位置出しは、まず、これ等4点をできるだけ同一

水平面上に来るようにセットした後、上述と同じ手順で行う。

(iv) マグネットのブースターストリートセクションへの設置

完了したセプタムマグネットを加速器リングの所定の位置へ設置する時は、以下の手順で行う。

㉞ 高さの位置出し

スケールを垂直に置き、レベルの水平カーソル線を、ブースタービームの高さに距離 b (第 17 図参照) を加えた値にセットする。(第 23 図) に示すように、チェンバーフランジ側面の 3ヶ所の印 (A, B, C) が、このカーソル線に一致するよう架台の高さを調節する。

㉟ 水平方向の位置出し

セプタムマグネットをほいむ二つのブースターマグネット間に、設計上、チェンバーの中央点を結ぶ直線となる位置にワイヤ線を張り、錘を下ろす。その錘の先端が、チェンバー中央点 (D, E) と一致するよう水平方向を調節する。

㊱ ビーム方向の位置出し

ブースターマグネット端板と、チェンバーフランジとの距離を設計図上で計算し、その値 (1) に一致するようビーム方向の調節を行う。

以上で三方向の位置出しを終了したのであるが、(ii) 項と同様、一方向の位置調節を行うと、他の二方向にも影響があるので、三方向の位置出しを数回行い、最終的に三方向の位置出しが、公差内に入るようにしなければならぬ。

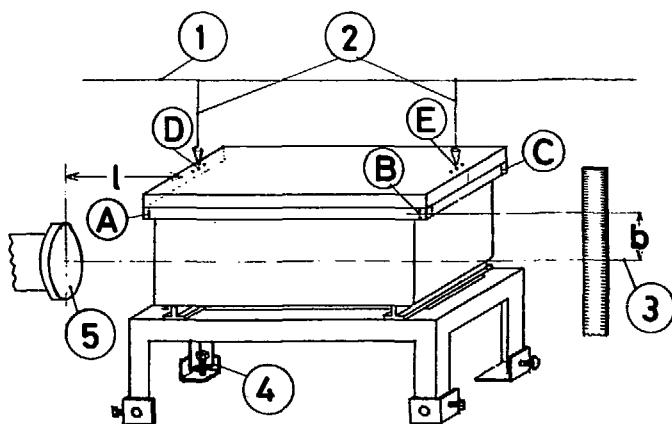


Fig. 23
Method of setting septum magnet chamber

1. Radial beam line
2. Plumb
3. Vertical beam line
4. Adjustment mechanism in three directions
5. Beam duct flange

(4) 磁場測定

セファラムマグネットは、以下の磁場特性を持つ事が要求される。即ち、コア内のすべての位置で磁力線は垂直で同じ強さである事、及び、コア外（セファラムコイル外側）の残れ磁場はできるだけ小さい事である。製作したマグネットの磁場特性を検出する為、（第24図）に示すように、支持棒の先端に固定したホール素子とその定電流源、測定磁場信号波形の増幅器とストレージスクオアの装置が必要である。我々の場合はホール素子として、ドイツ・シーメンス社のFC32を用い、その電源として手製のバッテリー・100 mA定電流源、及び、信号波形の観測用に手製の100倍DCアンプを使用している。（第25図）に磁場測定の結果を示す。

§4 謝辞

マグネットを上蓋に吊るすアイデアを御教示下さった木村嘉孝教授と、真空中の冷却水パイプは、絶対継ぎ目無しで配管すべきであると御教へ頂いた石丸肇助教授に感謝致します。又、マグネットのセッティング法を我々と共に検討して頂きました東京精密測器の福田良正氏に御礼申し上げます。

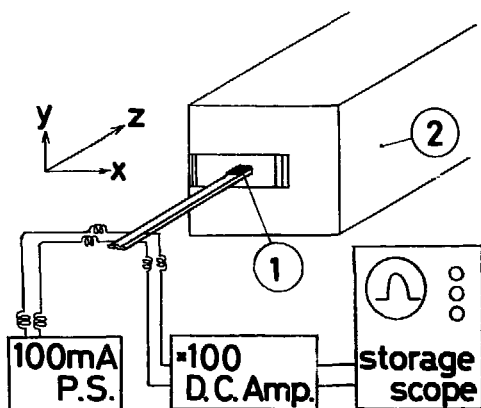


Fig.24
Measurement system of septum magnet field

1. Hall probe (SIEMENS FC32)
2. Magnet core

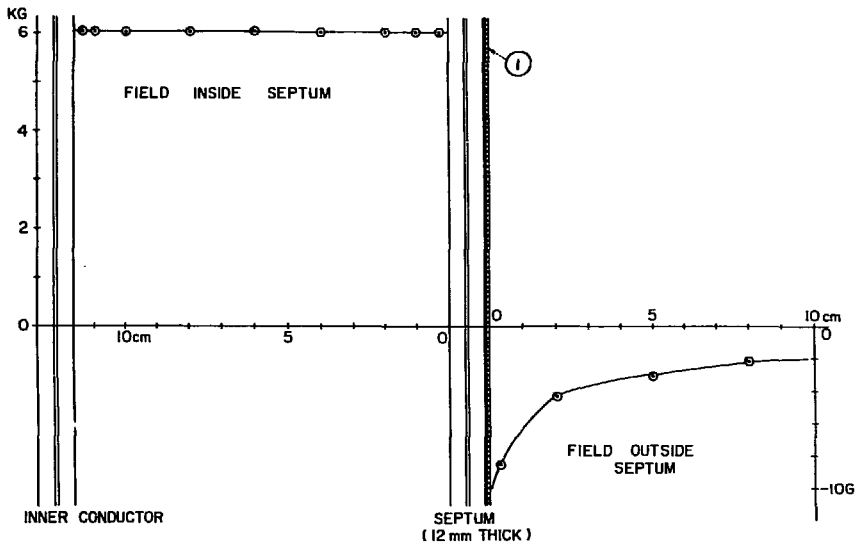


Fig.25(a)
Septum magnet field distributions along radial direction.

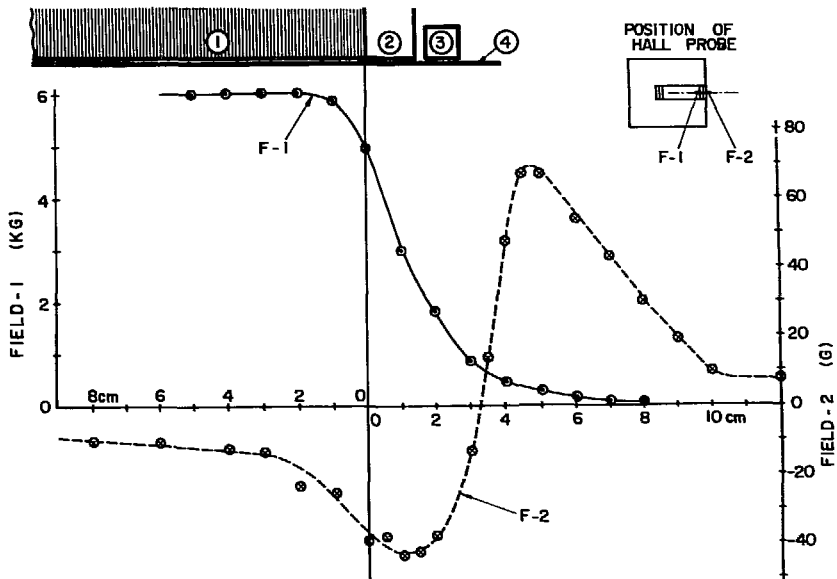


Fig.25(b)
Septum magnet field distributions along axial direction.